Procesos Constructivos Nivel III

ACUSTICA ARQUITECTONICA

Autor: Jorge Salinas

1. ASPECTOS FISICOS DE LA ACUSTICA

1.1 ACUSTICA. Concepto

Se entiende por acústica a la ciencia que estudia los cuerpos sonoros y la producción, transmisión y percepción del sonido. Dada la variedad de situaciones donde el sonido cobra importancia, son muchas las áreas de interés para su estudio: voz, música, grabación y reproducción de sonido, audiología, acústica arquitectónica, control de ruido, acústica submarina, aplicaciones médicas, etc. Por su naturaleza constituye una ciencia multidisciplinaria ya que sus incumbencias abarcan un amplio espectro de posibilidades. (Figura 1).

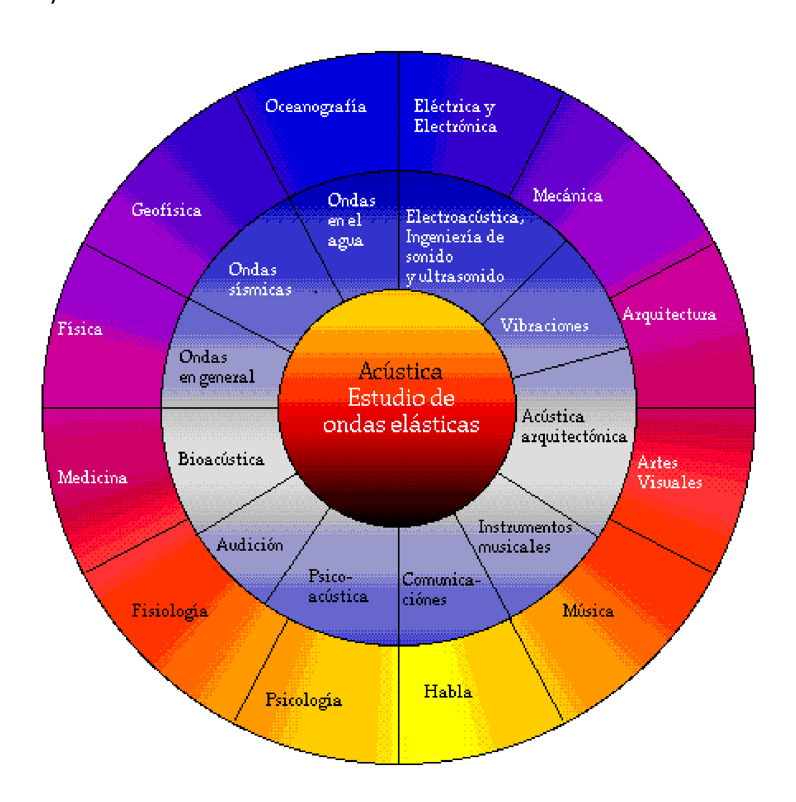


Figura 1. Áreas de interés de la acústica.

1.2 SONIDO

Es el resultado de las vibraciones provocadas por cuerpos sonoros. Al vibrar un cuerpo produce una alteración física del medio, que es el sonido propagándose en forma de ondas a través de un ambiente material (sólido, líquido, gaseoso) hasta llegar al sentido auditivo, donde nuevamente se producen vibraciones y como consecuencia de ello las sensaciones sonoras.

Para que este fenómeno ocurra debe cumplirse la condición de que exista: Una fuente, un medio y un receptor. La fuente *emite*, el medio *transmite* y el receptor *detecta* el sonido o bien es en general afectado por el mismo de alguna manera determinada (Figura 2). Mediante estudios se ha podido establecer que la velocidad de sonido en el aire y a nivel del mar es de aproximadamente 340 mts/seg.

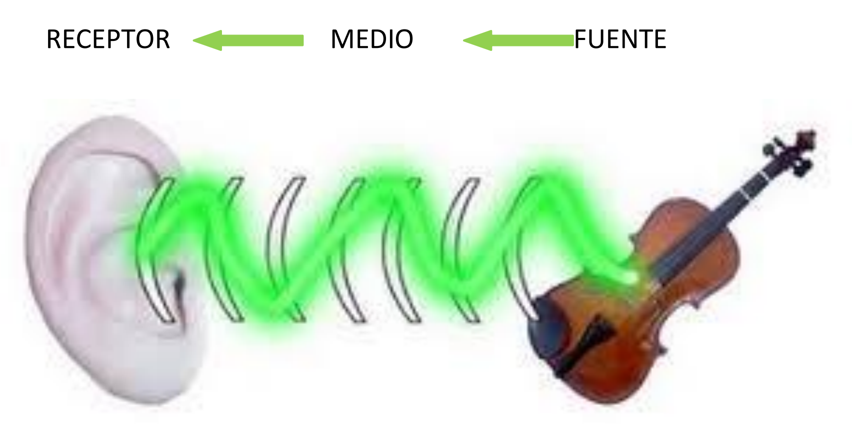


Figura 2.

1.3 ONDAS SONORAS

La transferencia del sonido al medio se hace en forma de ondas denominadas *ondas sonoras*, causadas por una influencia o perturbación que se inicia en un punto determinado (fuente o emisor) y es transmitida o propagada a otro punto, según las propiedades físicas de dicho medio, a través del cual la perturbación se desarrolla. El sonido necesita de un medio "elástico" para ser conducido, ya que este no puede transmitirse a través del vacío. Asimismo la velocidad que la onda adquiere dependerá de las condiciones materiales y de temperatura del medio.

Cuando se produce la propagación de las ondas sonoras lo que se transporta en ella no es materia sino energía. Aquello que es emitido, transmitido y detectado es energía, la cual es parcialmente potencial y parcialmente cinética. Es potencial debido al "trabajo" suministrado por el cuerpo emisor asociado con la presión sonora, mientras que cinética por el movimiento en sí mismo, es decir el desplazamiento originado. En este caso se trata de energía elástica porque implica variaciones de presión en el medio en el cual se desarrolla.

Las ondas sonoras pueden ser longitudinales o transversales. Las longitudinales son aquellas donde las partículas del medio afectado vibran en forma paralela a la dirección de propagación, las transversales se distribuyen en forma perpendicular a su dirección de propagación. Estas últimas se encuentran únicamente en sólidos, y no en los fluidos ya que estos carecen de resistencia de corte.

1.4 PROPAGACION DEL SONIDO

En el caso que nos ocupa el medio en el cual se desarrolla el sonido es el aire y de acuerdo a lo dicho antes, su desplazamiento es mediante ondas longitudinales.

Cuando un cuerpo sonoro entra en vibración emite esas vibraciones radialmente, y produce una deformación repentina del aire (medio) inmediato al mismo, alterando la posición de las moléculas de aire alcanzadas por esa vibración. Estas, a su vez, ejercerán fuerzas sobre otras vecinas transmitiéndoles la "orden" de ponerse en movimiento. Durante este proceso se produce un fenómeno llamado de *compresión y rarefacción.* En efecto, las moléculas en estado de vibración, "empujan" a las que se encuentran delante produciendo un estado de *compresión*, al mismo tiempo detrás ellas se genera una expansión donde las moléculas entran precipitadamente para llenar el vacío, efectuando la denominada *rarefacción*. (figura 3).

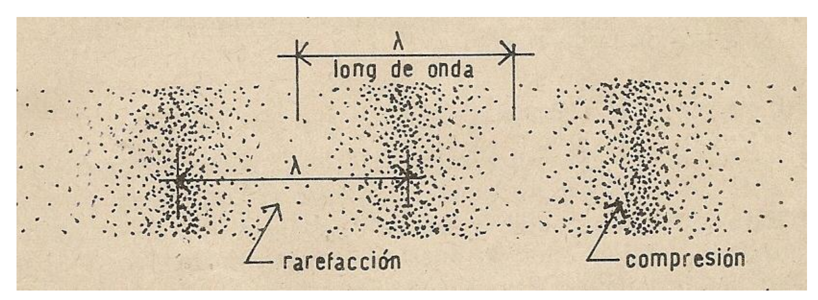


Figura 3. Compresiones y rarefacciones

Esta manifestación se da continuamente a lo largo del espacio en el que se transmite. El movimiento molecular origina entonces presiones y expansiones, o sea ondas alternas de presión (variaciones de presión). El fenómeno es comparable al siguiente ejemplo: Supongamos tener una serie de cuerpos paralelos separados a cierta distancia y suspendidos por cuerdas sujetas a un elemento rígido (figura 4a.) Al ejercerse una fuerza sobre el primero de los cuerpos, comenzará una reacción en cadena donde los mismos se golpean unos contra otros sucesivamente, observándose que los puntos donde se exhibe su máxima acumulación se producen las compresiones (máxima presión) y las rarefacciones donde los desplazamientos son leves o nulos (mínima presión) (figura 4 b.)

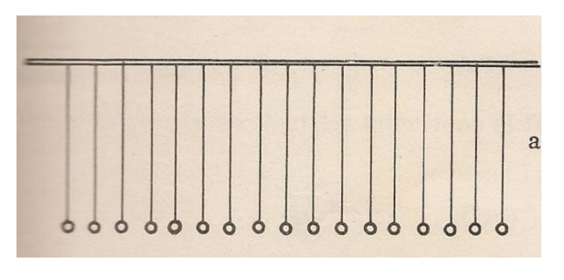
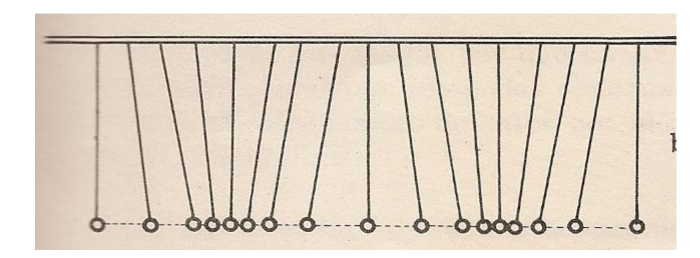


Figura 4a.


Figura 4b.

Es necesario aclarar que el ejemplo descripto es al solo efecto de comprender como ocurre el fenómeno. En realidad las moléculas de aire no se deslizan tocándose tangencialmente unas a otras, cada una de ellas oscilan alrededor de su punto de reposo, lo único que avanza es la perturbación que no es otra cosa que el sonido desplazándose.

1.5 MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE

Hasta ahora hemos visto que el sonido se propaga mediante ondas sonoras conformadas por vibraciones. Es necesario entonces referirnos con mayor especificidad a dichas vibraciones mediante el concepto de *movimiento armónico simple*.

El movimiento armónico simple es la forma más sencilla del llamado movimiento periódico, es decir aquel que se repite exactamente a intervalos regulares de tiempo. Hay muchos ejemplos en la naturaleza de ello: la oscilación de un péndulo, una rotación constante, las oscilaciones de átomos, etc. Cuando una partícula se desplaza simétricamente desde un punto fijo llamado de equilibrio o reposo y su aceleración es siempre proporcional a su distancia, entonces dicha partícula se mueve según el movimiento armónico simple. Se observa que este movimiento representa una vibración.

Una vibración pura o armónica queda determinada por tres parámetros: *amplitud*, *período* y *frecuencia*, los cuales desempeñan un rol fundamental en la percepción del sonido:

Amplitud: Es la distancia entre el punto de equilibrio y la posición extrema alcanzada por el cuerpo en oscilación.

Período: Es el tiempo en que un cuerpo realiza una vibración completa. La vibración completa es el movimiento efectuado por dicho cuerpo de un punto extremo a otro punto extremo y regresando a su punto de equilibrio. A este último se lo llama *ciclo*.

Frecuencia: Es el número de vibraciones completas o ciclos realizadas por unidad de tiempo.

Las frecuencias se expresan en *ciclos por segundo*. Esta unidad se llama hertz, en honor al físico alemán Heinrich Hertz (1857-1884) y se denomina con la abreviatura *Hz*. Por lo tanto si una vibración se produjera a una frecuencia de 5 ciclos por segundo, sería de 5 Hz.

El movimiento armónico simple puede ser analizado geométricamente y así reconocer los parámetros descriptos, graficándolos sobre ejes de abscisas y ordenadas ***x - y***. Teniendo en cuenta la figura 5, imaginemos un cuerpo (**R**) realizando un movimiento circular uniforme sobre el diámetro de una circunferencia en sentido contrario a las agujas del reloj. Si en cada punto del mismo detuviéramos el cuerpo, y proyectáramos esa situación sobre los ejes de coordenadas ***x – y***, conviniendo que en ***x*** se registra el período (T) y en ***y*** la amplitud (A), obtendríamos respectivamente los diferentes instantes y posiciones que dicho cuerpo adquiere.

Ahora bien, si suponemos que una vuelta completa partiendo de la posición T0 de la circunferencia corresponde a un período (T) de 1 segundo y durante ese lapso se producen 2 ciclos, estaríamos en condiciones de establecer que se produjo una frecuencia de 2 ciclos por segundo, o lo que es lo mismo de 2 Hz.

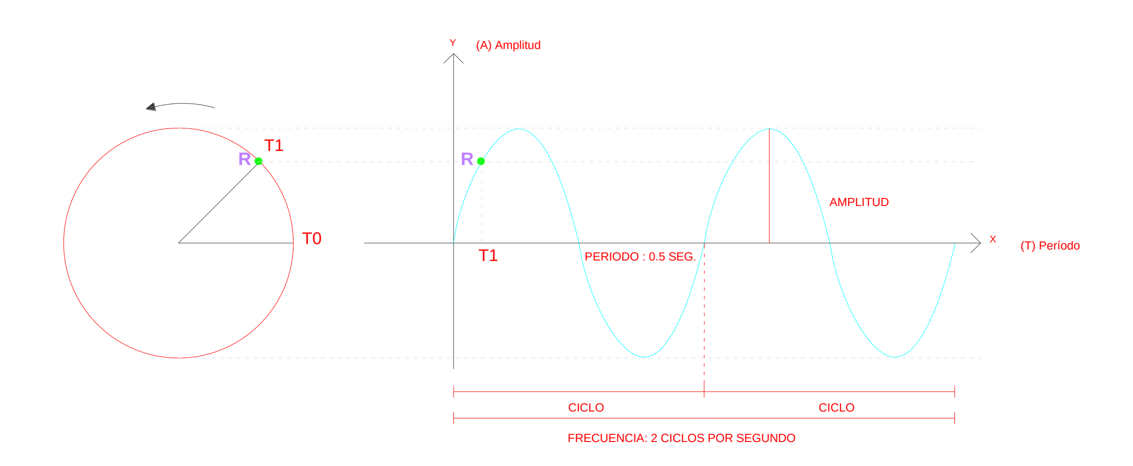


Figura 5. Movimiento Armónico Simple

1.6 INFRASONIDO Y ULTRASONIDO

Las frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20.000 Hz, son percibidas como sonido por las personas, y podrán variar dependiendo de las propiedades del sonido y de la edad de los individuos. Estas a su vez se dividen en intervalos llamados octavas, que es una banda de frecuencias donde las subsiguientes resulta el doble de la anterior. En el campo acústico arquitectónico las octavas más utilizadas son 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz.

Pero existen frecuencias que para el oído humano que no resultan audibles y que sobrepasan los límites inferior y superior del rango establecido. A estas se las denomina *infrasonido* y *ultrasonido*.

Los infrasonidos son aquellos que se producen a una frecuencia por debajo de los 20 Hz, mientras que los ultrasonidos son los que superan los 20.000 Hz. Estas últimas son percibidas por refinados sentidos de audición tal es el caso de ciertos animales que perciben ultrasonidos de hasta 120.000 Hz.

1.7 PROPIEDADES DEL SONIDO

Para realizar un adecuado análisis acústico es necesario poder establecer las diferencias entre los sonidos a través de sus propiedades, las cuales son: Intensidad, altura y timbre.

Intensidad sonora:
Se denomina Intensidad sonora a la cantidad de energía contenida por unidad de superficie. La energía se propagara en forma esférica y a medida que el radio de cada esfera aumenta su concentración será cada vez menor.
La intensidad sonora viene asociada con parámetros de potencia sonora y presión sonora. La primera está relacionada a la fuente y es la cantidad de energía liberada por la misma en una unidad de tiempo. La segunda se produce cuando dicha energía al generar desplazamientos, provocan variaciones alternas en la presión estática del medio en el cual transcurre. (Figura 6).

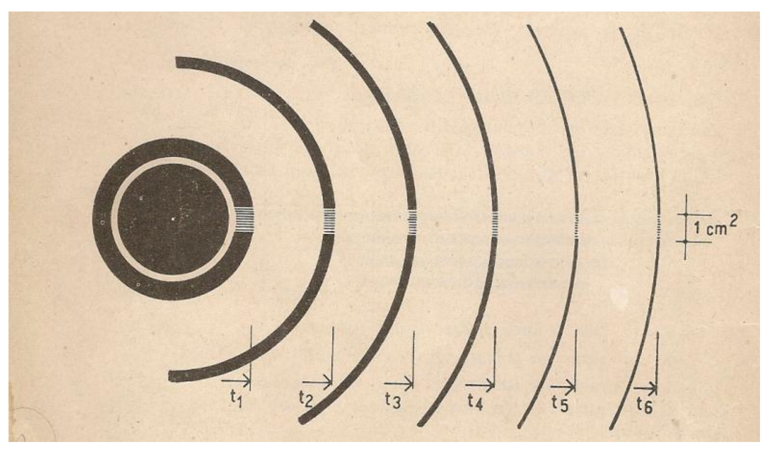


Figura 6.

Para poder efectuar su medición se recurre a una magnitud utilizada en otros campos de la física llamada decibel (dB), que lo que establece no son unidades de medida sino *niveles*. La mayoría de los niveles en lo que respecta al campo del sonido, han sido tabulados tomando como extremos dos limites de sensitividad auditiva, uno inferior o umbral de sensación auditiva y un superior o umbral del dolor. A continuación, podemos ver algunos valores tabulados en decibeles en la tabla 1:

NIVELES DE INTENSIDAD SONORA

Nivel	Fuente emisora
140 dB	Umbral del dolor
130 dB	Avión despegando
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto
100 dB	Herramientas eléctricas
90 dB	Trafico
80 dB	Tren
70 dB	Electrodomésticos
50/60 dB	Aglomeramiento de gente
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Ruido en el campo
0 dB	Umbral de la audición

Tabla 1.

Altura:
Otra de las propiedades está dada por la altura o tono, que establece la relación entre la sensación subjetiva del sonido y el valor objetivo de la frecuencia, lo que permite distinguir entre sonidos graves y agudos. Así la altura depende de la frecuencia de la onda, si la frecuencia es menor es decir más baja los sonidos tienden a ser graves, si la misma es mayor o más alta los sonidos se percibirán como agudos.
El oído humano puede sensibilizar frecuencias apenas audibles, por ello se emplean escalas de decibeles en referencia a diversos objetos que son fuentes de sonido. Para identificar un sonido, el oído capta la frecuencia más baja a la que se llama frecuencia fundamental.

Timbre:
Esta dado por la capacidad de identificar el mismo sonido emitido por distintas fuentes. Esto es debido a la forma de las ondas sonoras. Asimismo nuestro oído es capaz de distinguir dos sonidos de la misma intensidad y frecuencia, aun cuando las formas emitidas sean diferentes. Se provoca el mismo fenómeno en la voz humana, por eso diferenciamos las voces de cada persona. Al hablar de timbre identificamos, vocales, instrumentos musicales, ruidos de entorno, etc.

1.8 RUIDO

El ruido constituye una señal indeseada, es decir la sensación de desagrado por parte del oyente, pero mas allá de esta definición que se basa en la percepción subjetiva, se entiende al ruido como un sonido compuesto en el que no está definida la composición armónica, es decir que no se mantiene constante aun en intervalos cortos.
El comportamiento del ruido sería similar a lo que sucede con aparatos de transmisión cuando recepciona ondas eléctricas inadecuadas en un canal determinado, desde el punto de vista del sonido sería cualquier alteración no deseada dentro de un rango de frecuencia útil.

2. EL HOMBRE Y EL SONIDO

El análisis del comportamiento acústico en los espacios y el tratamiento que de ello derive, responde a una razón concreta: *el logro de las condiciones acústicas adecuadas de los ambientes tendientes al confort auditivo*. Por tal motivo resulta importante conocer acerca de la conformación del oído humano y como en él se produce la captación del sonido.
La generación de las sensaciones auditivas en el ser humano es un proceso complejo, el cual se desarrolla básicamente en tres etapas:

- La captación y el procesamiento mecánico de las llamadas ondas sonoras
- La conversión de las señales acústicas en impulsos nerviosos
- La transmisión de esos impulsos hasta los centros sensoriales del cerebro.

Los mecanismos de captación y procesamiento se llevan a cabo en el oído propiamente dicho. Este se divide en tres zonas, llamadas oído externo, oído medio y oído interno. Los estímulos sonoros se difunden en estas zonas, experimentando diferentes mutaciones hasta su transformación final en impulsos nerviosos.

2.1 SISTEMA AUDITIVO

Oído Externo:
El oído externo está conformado por el pabellón (oreja), hélix (Borde) y lóbulo. A partir de allí mediante una apertura se desarrolla el conducto auditivo el cual es un tubo de aproximadamente 2 cm de longitud por

0.7 cm de diámetro, que protege las delicadas estructuras del oído medio mediante la producción de cerumen. En el extremo interior se encuentra la membrana timpánica o tímpano, que es una membrana delgada formada por un tejido fibroso cuya cara externa es cóncava recubierta de una fina piel y en su interior una formación mucosa adherida a ella . Esta es un área frágil que puede sufrir rupturas.

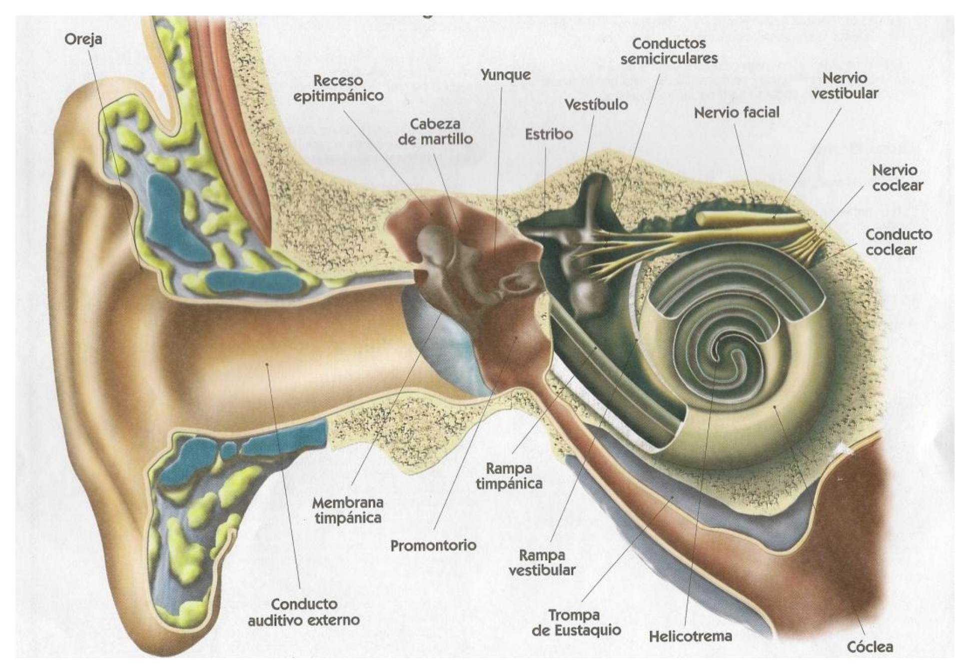


Figura 7. Oído Humano

Oído Medio:

Está constituido básicamente por una cavidad aérea (promontorio) con revestimiento epitelial enclavada en el hueso temporal, donde se aloja una cadena conformada por tres huesecillos llamados martillo, yunque y estribo, los cuales se unen de manera articulada. En el extremo exterior, el martillo se encuentra adherido a la membrana timpánica mediante un musculo denominado musculo tensor y en el final de la cadena, tomado a la base del estribo, se encuentra otro musculo llamado estapedio, que es un anillo flexible unido a las paredes de la ventana oval, conformado por un orificio que constituye la vía de entrada al oído interno.

En esta cavidad que es el oído medio, aparece una comunicación con el exterior, más precisamente a la nasofaringe, formada por la tuba auditiva más conocida como trompa de Eustaquio, que tiene por función equiparar las presiones internas y externas de aire, a ambos lados de la membrana timpánica y evitar los cambios bruscos de presión que puedan provocar daños al tímpano.

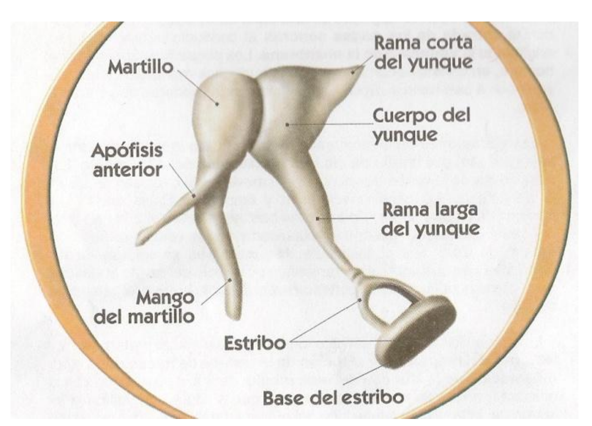


Figura 8. Cadena de Huesecillos del oído medio

Oído Interno:

Es llamado también laberinto por la complejidad de sus canales. Se divide en tres aéreas: los canales semicirculares, el vestíbulo y cóclea o caracol (figura 9). Este último es un conducto óseo en forma de espiral que contiene dos fluidos de diferente composición. El interior del conducto está dividido en sentido longitudinal, por la membrana basilar y la membrana de Reissner, las cuales forman tres compartimientos llamados escalas o rampas. En los extremos superior e inferior respectivamente, se hallan la rampa vestibular y la rampa timpánica, que contienen un mismo fluido llamado perilinfa, debido a que se interconectan por una pequeña abertura situada en el vértice del caracol, llamada helicotrema. Entre ellas, se halla la rampa media que se encuentra aislada de las otras dos escalas, y contiene un líquido de distinta composición a la perilinfa llamado endolinfa.
La rampa vestibular está en contacto con el oído medio, más precisamente con el estribo, mediante una ventana oval, mientras que la rampa timpánica se conecta al mismo mediante otra abertura llamada ventana redonda pero que está sellada con una membrana timpánica secundaria.
En el interior de la rampa media sobre la membrana basilar, se halla el órgano de Corti que contiene células ciliares o pilosas internas y sobre ellas la membrana tectorial dentro de la cual se alojan las prolongaciones de las células pilosas llamadas externas. Ambos tipos de células presentan conexiones con las fibras nerviosas que conforman el nervio auditivo (Figura 10).

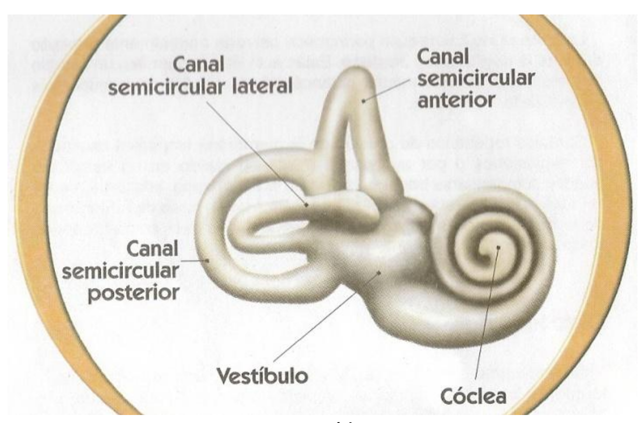


Figura 9. Oído interno

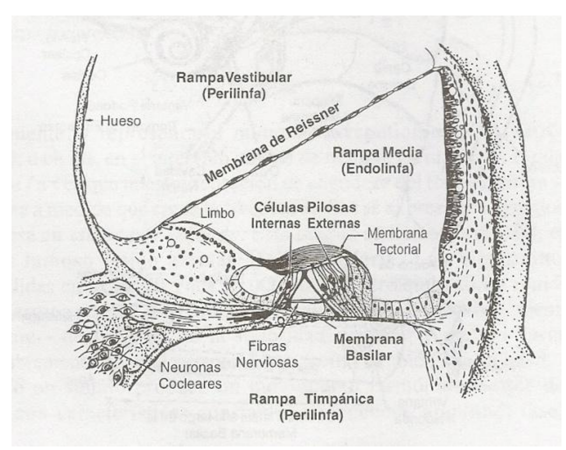


Figura 10.

2.2 FISIOLOGIA DE LA AUDICION

La captación del sonido por el oído humano, comienza en el oído externo que actúa como un embudo acústico incrementando la sensibilidad auditiva, a través del pabellón y hélix que tienen por función la recolección y encausamiento de las ondas sonoras, mediante el meato acústico externo o conducto auditivo en dirección al oído medio.
Las vibraciones formadas por oscilaciones de las moléculas del aire, llegan a la membrana timpánica en donde se producen cambios de presión (compresión y descompresión) en su pared externa, provocando que la membrana comience a vibrar conforme a las oscilaciones recibidas. Las vibraciones adquiridas por el tímpano varían en función de las frecuencias, si estas son bajas las oscilaciones serán lentas, en cambio ante altas frecuencias vibrará más rápido.
Las vibraciones del tímpano se transmiten a lo largo de la cadena de huesecillos, la cual opera como un sistema de palancas. El martillo toma las mismas de la membrana timpánica mediante el musculo tensor y por el movimiento articulado de esta cadena ósea, llega al estribo que a través del musculo estapedio genera un movimiento hacia afuera y hacia adentro en la ventana oval.
El estribo se encuentra en contacto con uno de los fluidos, por lo tanto el tímpano y la cadena de huesecillos actúan como un mecanismo que transforma las vibraciones por aire en vibraciones que se desplazan por fluidos. Para lograr que la transferencia de potencia del aire al fluido sea continua, o al máximo posible, debe efectuarse un acoplamiento entre la mecánica característica del aire y la del fluido,

por lo tanto la cadena de huesecillos actúa como un transformador (en electricidad, un acoplador de impedancias) que trata de llevar la misma potencia al oído interno.
El movimiento generado en la ventana oval ocasiona un desplazamiento del primero de los líquidos, la perilinfa, lo que produce un movimiento de las rampas vestibular y timpánica. Este movimiento pone en vibración a la membrana basilar aumentando la presión en el segundo de los líquidos, la endolinfa contenida en la rampa media.
Finalmente, este mecanismo hace que las células pilosas se vuelvan contra la membrana tectorial originando impulsos nerviosos, que son transmitidos al cerebro donde se producen las sensaciones sonoras.

3. ACUSTICA ARQUITECTONICA

La importancia de la acústica en la arquitectura viene dada por la necesidad de reconocer los fenómenos vinculados con una propagación adecuada y funcional del sonido en los distintos espacios, lo cual conlleva el problema de la correspondencia al tratamiento acústico.
Los espacios con funciones determinadas, deben entonces poseer cualidades acústicas aptas para su aplicación, dichas cualidades están relacionadas con el comportamiento del sonido en los distintos recintos.

3.1 ECO

El eco es el fenómeno sonoro más sencillo. El mismo resulta de la repetición de un sonido que consiste en el reflejo de la onda sonora en un cuerpo duro. El sonido, al reflejarse, regresa al punto donde se encuentra la fuente emisora, con un cierto retardo y, de esta forma, el oído lo distingue como otro sonido independiente. Su velocidad es la decima parte de la velocidad del sonido en el aire y necesita un mínimo de 34 metros para que el fenómeno se produzca (17 metros de ida y 17 metros de vuelta)

3.2 REFLEXIONES TEMPRANAS

Cuando una fuente sonora está rodeada por varias superficies (pisos, paredes, techos) y esta emite el sonido, un oyente recibirá el sonido directo y también el reflejado en cada una de las superficies. A las primeras reflexiones recibidas se las denomina reflexiones tempranas. Cuando los ambientes no son muy grandes, las reflexiones producidas están bastante cercanas en el tiempo unas de otras, pero no llegan a ser percibidas como eco (Figura 11).

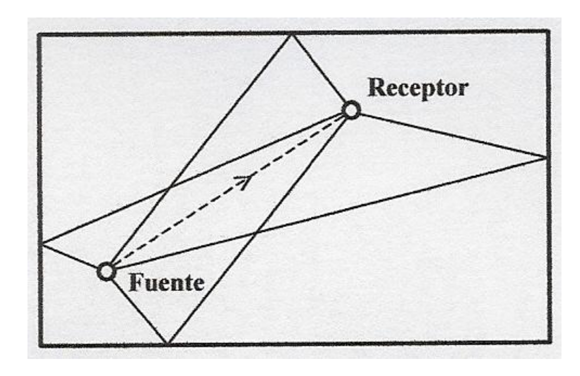


Figura 11. Reflexiones tempranas

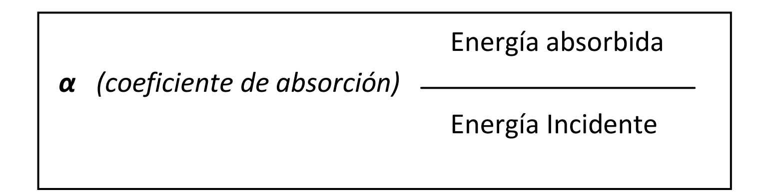
3.3 AMBIENCIA

Es la sensación que permite al oyente identificar auditivamente el espacio en que se encuentra. La ambiencia es el resultado de la distribución en el tiempo de las reflexiones. Arquitectónicamente el control

de la ambiencia es posible. El mismo se realiza mediante programas computarizados, y consiste en trazar sobre el plano de una sala “rayos” midiendo sus recorridos y determinar los tiempos de llegada al receptor de las correspondientes reflexiones.

3.4 ABSORCION

Cuando las superficies de un recinto reflejan el sonido solo lo hacen parcialmente, un determinado porcentaje absorbe el sonido que incide sobre ellas. La absorción dependerá del tipo de material y el recubrimiento de las superficies.
Habíamos visto que la emisión del sonido lleva consigo energía, lo cual lleva a definir el coeficiente de *absorción sonora* ***α*** (alfa) como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente.



$$\boldsymbol{\alpha} \quad \textit{(coeficiente de absorción)} \quad \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía Incidente}}$$

El coeficiente de absorción sonora tiene una gran importancia en el comportamiento acústico de un ambiente. Por esta razón se han medido y tabulado los coeficientes de absorción para varios materiales y objetos. Generalmente los materiales duros como el hormigón o el mármol son muy reflectores y por lo tanto poco absorbentes del sonido, y en cambio las materiales blandos y porosos, como la lana de vidrio, son poco reflectores y por consiguiente muy absorbentes.
En la tabla 2 se dan valores de α para varios materiales típicos de la construcción, objetos y personas. Los coeficientes de absorción se proporcionan teniendo en cuenta varias frecuencias, que suelen ser las más utilizadas en el campo de la arquitectura, ya que dicho coeficiente depende bastante de ese valor.
En general el coeficiente aumenta con las frecuencias, ya que en las más altas la longitud de la onda es pequeña y entonces la irregularidades y el espesor de las superficies son comparables a la longitud de la onda.

3.5 TIEMPO DE REVERBERACION

Después de haberse producido las reflexiones tempranas, comienzan a aparecer las reflexiones de las reflexiones tempranas y luego las reflexiones de las reflexiones y así sucesivamente, dando origen a una situación compleja donde las reflexiones se densifican cada vez mas. Esta permanencia del sonido aun después de interrumpida la fuente emisora del sonido, se denomina *reverberación*.

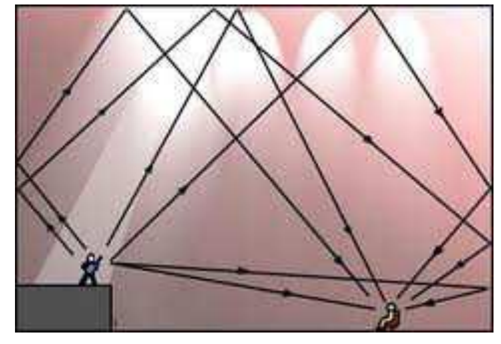


Figura 12. Reverberación

En cada reflexión una parte del sonido es absorbida y otra reflejada. Las partes absorbidas se transformaran en minúsculas cantidades de calor o serán transmitidas a espacios contiguos o bien ambas cosas. La parte reflejada mantiene su carácter de sonido, y se propagara dentro del recinto hasta que se encuentre con otra superficie, en la cual de nuevo una parte se absorbe y otra se refleja. El proceso continúa así hasta que la mayor parte del sonido sea absorbido, y el sonido reflejado sea ya demasiado débil para ser audible.
Para hacer mensurable esta extinción del sonido se utiliza el concepto de *tiempo de reverberación* (T), definido como *el tiempo en que demora en bajar el sonido a 60dB por debajo de su nivel inicial*. Se toma el parámetro de 60dB porque con esta caída de decibeles, se tiene la sensación de que el sonido se ha extinguido completamente. Por ejemplo si se interrumpe un sonido emito a 90dB y este en 3 segundos registra una caída hasta los 30dB (baja 60 dB), entonces el tiempo de reverberación (T) será de 3 segundos.
El tiempo de reverberación dependerá de cuan absorbentes y/o reflectoras sean las superficies, por lo tanto su duración estará supeditada a ello. Este fenómeno se obtiene mediante cálculo utilizando la formula de Sabine:

$$T \text{ (tiempo de reverberación)} = 0.161 \quad \frac{V}{\alpha \times S}$$

Donde:

T: es el tiempo de reverberación

0.161: coeficiente fijo

α: coeficiente de absorción

V: volumen del ámbito en m3

S: sumatoria de todas las superficies en m2

Ejemplo: Supongamos una sala de 4 m de ancho por 7 m de largo por 3 m de alto, entonces:

S = 4x3 + 4x3 + 7x3 + 7x3 + 7x4 + 7x4 = 122 m2
V = 4x7x3 = 84 m3
α= 0.1

T = 0.161 x 84 /0.1 x 122= 1.10 seg.

En realidad las superficies de un recinto no tienen coeficientes de absorción iguales, debido a su conformación material, como un muro y un cielorraso, por lo tanto a cada superficie corresponde multiplicarlo por su correspondiente coeficiente de absorción.

3.6 CAMPO SONORO DIRECTO Y REVERBERANTE

Otro elemento que interviene en la acústica es la forma de distribución del campo sonoro en un ambiente. El campo sonoro es el valor que adquiere la presión sonora en cada punto del espacio.
Este se divide en dos valores, directo y reverberante. El campo sonoro directo es el que acaba de ser emitido por la fuente y que no ha experimentado aun ninguna reflexión, en cambio el reverberante es el que incluye el sonido después de la primera reflexión.
Estos dos componentes tienen comportamientos muy diferentes. El campo directo *disminuye* a medida que se distancia de la fuente emisora, y lo hace a razón de 6 dB por cada duplicación de distancia. Así si a 1 metro de la fuente se mide una presión sonora de 80 dB, a 2 metros medirá 74 dB, a 4 metros 68 dB y así sucesivamente.
El campo reverberante, en cambio resulta *constante* en los ambientes cerrados, como habitaciones, salas, etc. Esto se debe a que el sonido sufre multitud de reflexiones, y todas ellas se superponen entre sí.

La condición de que convivan estos dos componentes es que el sonido se produzca en ámbitos cerrados, en el descampado solo predomina el campo directo, en ambientes cubiertos quienes estén cercanos a la fuente emisora percibirán el campo directo, ya que solo a determinada distancia predominará el campo reverberante.

De lo anterior se desprende que el campo reverberante será mayor cuantas más reflectoras del sonido sean las superficies de un espacio, o bien cuanto menor coeficiente de absorción posean las mismas. Como también el tiempo de reverberación aumenta cuando aumentan las reflexiones, resultará que *a mayor tiempo de reverberación, mayor campo reverberante.*

Esto explica porque en ambientes con superficies duras como gimnasios, el nivel sonoro es tan alto. Hay un aumento de presión sonora y un mayor campo reverberante, este tiende a enmascarar el habla por lo que las personas tienden a subir la intensidad de la voz, aumentando el campo directo para comunicarse con otras personas, lo cual contribuye al problema pues, entregan energía que acrecienta la presión sonora magnificando la situación.

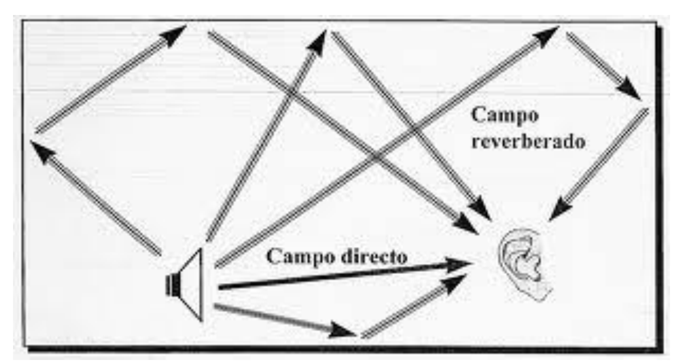


Figura 13. Campo sonoro directo y reverberante

3.7 RESONANCIAS

La resonancia es otro elemento de incidencia en la calidad acústica de un ambiente y se produce en salas de pequeño tamaño. Este fenómeno ocurre como consecuencia de reflexiones sucesivas en superficies opuestas cercanas, al generarse una onda sonora que viaja perpendicularmente a dos paredes enfrentadas al reflejarse sobre una de ellas lo hará perpendicularmente sobre la otra y al volver sobre sí misma repetirá el proceso, generando lo que se conoce como *onda estacionaria*, es decir una onda que va y vuelve una y otra vez entre dos superficies. (Figura 14).

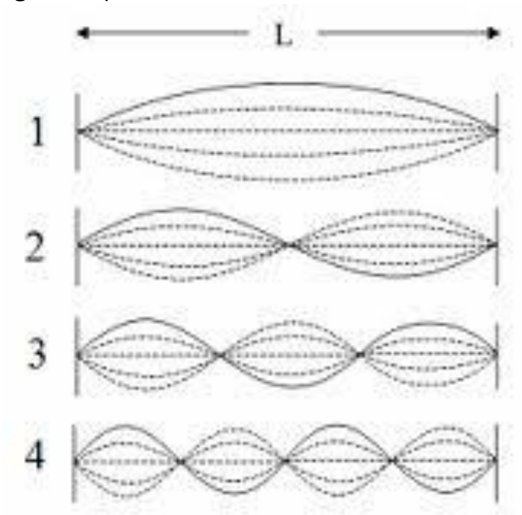


Figura 14. Ondas estacionarias. Variaciones con la frecuencia

¿Qué consecuencias tiene este efecto para las condiciones acústicas de un recinto? el caso es que si se produce un sonido de un determinado nivel de intensidad y potencia, la acústica de este tipo de recintos

tiende a amplificarlo en desmedro de otros sonidos, predominando o encubriendo a los otros. Esto se considera un defecto acústico porque da lugar a una difusión no uniforme del sonido.

Material	Coeficiente de absorción α a la frecuencia					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Hormigón pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ladrillo visto sin pintar	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Ladrillo visto pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Revoque de cal y arena	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Placa de yeso (Durlock) 12 mm a 10 cm	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Yeso sobre metal desplegado	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03
Mármol o azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Madera en paneles (a 5 cm de la pared)	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Madera aglomerada en panel	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Parquet sobre asfalto	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Parquet sobre listones	0,20	0,15	0,12	0,10	0,10	0,07
Alfombra de goma 0,5 cm	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Alfombra de lana 1,2 kg/m^2	0,10	0,16	0,11	0,30	0,50	0,47
Alfombra de lana 2,3 kg/m^2	0,17	0,18	0,21	0,50	0,63	0,83
Cortina 338 g/m^2	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina 475 g/m^2 fruncida al 50%	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
Espuma de poliuretano (Fonac) 50 mm	0,15	0,25	0,50	0,94	0,92	0,99
Espuma de poliuretano (Fonac) 75 mm	0,17	0,44	0,99	1,03	1,00	1,03
Espuma de poliuretano (Sonex) 35 mm	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89
Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01
Espuma de poliuretano (Sonex) 75 mm	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m^3) 25 mm	0,15	0,25	0,40	0,50	0,65	0,70
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m^3) 50 mm	0,25	0,45	0,70	0,80	0,85	0,85
Lana de vidrio (panel 35 kg/m^3) 25 mm	0,20	0,40	0,80	0,90	1,00	1,00
Lana de vidrio (panel 35 kg/m^3) 50 mm	0,30	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00
Ventana abierta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04
Panel cielorraso Spanacustic (Manville) 19 mm	–	0,80	0,71	0,86	0,68	–
Panel cielorraso Acustidom (Manville) 4 mm	–	0,72	0,61	0,68	0,79	–
Panel cielorraso Prismatic (Manville) 4 mm	–	0,70	0,61	0,70	0,78	–
Panel cielorraso Profil (Manville) 4 mm	–	0,72	0,62	0,69	0,78	–
Panel cielorraso fisurado Auratone (USG) $^5/_8$”	0,34	0,36	0,71	0,85	0,68	0,64
Panel cielorraso fisurado Cortega (AWI) $^5/_8$”	0,31	0,32	0,51	0,72	0,74	0,77
Asiento de madera (0,8 m^2/asiento)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08
Asiento tapizado grueso (0,8 m^2/asiento)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Personas en asiento de madera (0,8 m^2/persona)	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Personas en asiento tapizado (0,8 m^2/persona)	0,53	0,51	0,51	0,56	0,56	0,59
Personas de pie (0,8 m^2/persona)	0,25	0,44	0,59	0,56	0,62	0,50

Tabla 2. Coeficientes α de absorción

3.8 ABSORBENTES ACUSTICOS

Los materiales de construcción y los revestimientos tienen propiedades absorbentes muy variables y es en función de sus características, siendo algunas de ellas la rugosidad y el nivel de porosidad que posean. Al hablar de absorción, nos interesamos solo por las energías incidentes y reflejadas, tal es así que la absorción máxima está representada por la ventana abierta, ya que allí toda la energía es absorbida sin reflejarse hacia atrás.

El tratamiento para el acondicionamiento acústico, suele efectuarse con elementos materiales destinados a cumplir únicamente con ese requerimiento, que se tornan más específicos cuando se trata de desarrollos arquitectónicos particulares tales como salas de grabación, radiodifusión, teatros, etc.

Podríamos distinguir entre materiales acústicos absorbentes y sistemas acústicos absorbentes. En el primero de los casos, son los materiales en sí mismos quienes tienen la propiedad de realizar la absorción del sonido, mientras que los sistemas ya no dependen tanto del material o los materiales utilizados, sino de las estrategias y montajes realizados para cumplir con el control acústico de los recintos.

Materiales Absolventes:

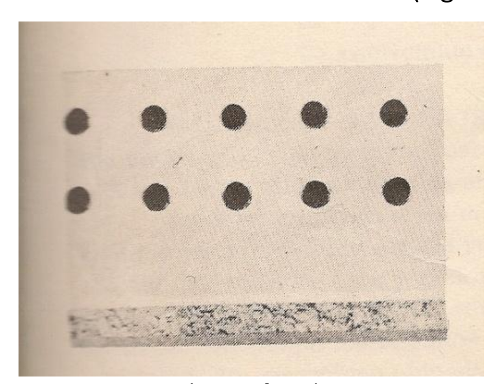
Se trata de materiales del tipo compresible o esponjoso que tienen la característica de ser porosos, es decir que poseen cavidades de aire comunicadas entre sí. Como ejemplos podemos citar la lana mineral, lana de fibra de vidrio, corcho, espuma de poliuretano, etc. (Figura 15)



Figura 15. Materiales absorbentes

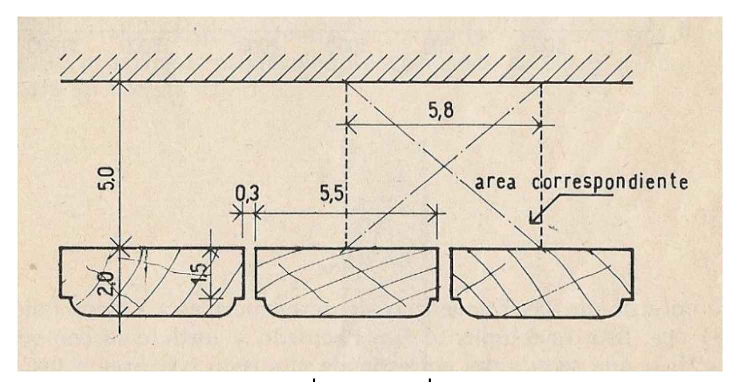
El mecanismo de absorción en todos ellos, consiste en la degradación de la energía sonora por efecto del roce de las moléculas de aire contra las fibras del material. La energía sonora comprime su superficie y trabaja como si fuera un resorte, al incidir la onda sonora, esta intenta penetrar al material por sus intersticios, provocando el movimiento dentro del mismo, y su eficacia será mayor cuando la longitud de la onda incidente es del orden del tamaño de los poros. Es por ello que los materiales absorbentes mejoran su prestación a medida que disminuye la longitud de la onda, o sea para frecuencias más elevadas.

El espesor del material es importante para determinar la absorción máxima. La energía sonora, penetra el material solo hasta determinada profundidad, a partir de la cual es inútil agregar mayor espesor, pero en cambio se perderán posibilidades de absorción si el espesor no es el adecuado.
La utilización de estos materiales trae aparejada algunos problemas de orden práctico, como su apariencia, durabilidad, resistencia a la humedad, degradación, etc. En estos casos se recurre a paneles de terminación (Aluminio, madera industrializada, roca de yeso, etc.) en lo posible perforados o ranurados, ocultando el material absorbente que se encuentra detrás. El rol del emplacado es de revestimiento ya que ellos mismos no tienen la función absorbente. (Figura 16)





Paneles perforados

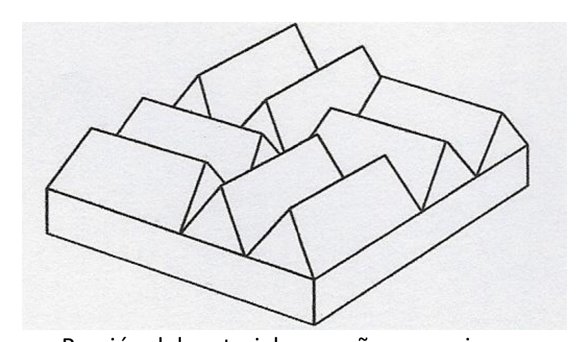


paneles ranurados

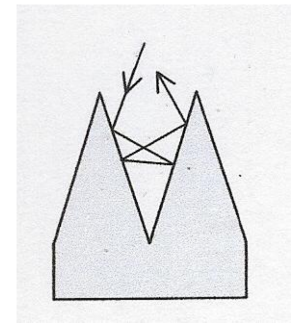
Figura 16. Paneles de terminación

En cielorrasos se suelen utilizar las espumas de poliuretano a la vista, estos son materiales que se fabrican facetados en forma de cuñas anecoicas, las cuales se comportan como una trampa de sonido ya que el mismo al incidir sobre una superficie de cuña se refleja varias veces sobre ella y la contigua. (Figura 17)
En pisos el tratamiento suele ser más complejo, a menudo se utilizan alfombras que además de cierto grado de absorción atenúan los impactos por golpes.
Otro elemento vertical que se utiliza para este fin son los cortinados, que a mayor separación del paramento crece su efectividad. Es importante su porosidad y espesor, como así si otorgarle forma a la misma, mediante plegados o fruncidos con lo cual se puede duplicar su coeficiente de absorción.





Porción del material con cuñas anecoicas



mecanismo de absorción

Figura 17.

Sistemas Absorbentes:

Paneles vibrantes:
Básicamente se trata de una estrategia mediante la cual se exponen superficies determinadas en movimiento para absorber las ondas sonoras. Cuando la energía sonora incide sobre la superficie, esta quedara sometida a una vibración y la posibilidad de moverse de la misma dependerá de su peso y rigidez, si los valores de estas características no fueran muy importantes, la superficie o placa vibrará produciendo un movimiento hacia adelante y hacia atrás. Podría decirse que a mayor cantidad de movimiento de la placa, mayor habrá sido la cantidad de energía sonora consumida.

Si la placa fuera utilizada para separar dos ambientes, este movimiento vibratorio realizado por la placa podría ser considerado como una nueva fuente sonora, dejando pasar parte importante del sonido y por lo tanto tendría un comportamiento poco eficiente como absorbente acústico, pero al ser instalado contra un cerramiento vertical dejando detrás una cámara de aire, cumple con las capacidades para el cual ha sido desarrollado. Asimismo el sistema mejora notablemente, cuando entre los paneles vibrantes y el cerramiento se intercala un material poroso absorbente como los descriptos anteriormente, elevando su coeficiente de absorción.
El desarrollo constructivo de este tipo de membranas, consta de placas impermeables elásticas de poco espesor como madera terciada o material plástico sujeto a un entramado resistente o bastidor que sostenga cada placa y sea lo suficientemente rígido como para tomar el movimiento de las láminas, a su vez convendrá montar el bastidor resultante con intercalación de un material resistente que permita al conjunto comportarse como una lamina elástica. (Figura 18).

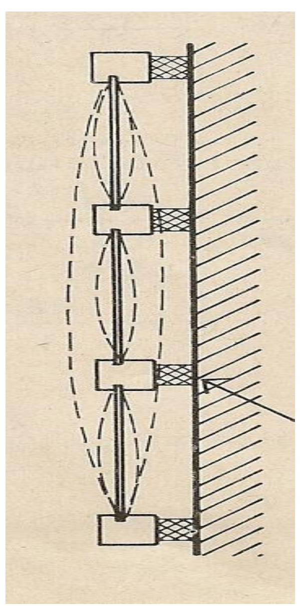


Figura 18 a.
Corte transversal de paneles vibrantes con cámara de aire adosados a un muro.

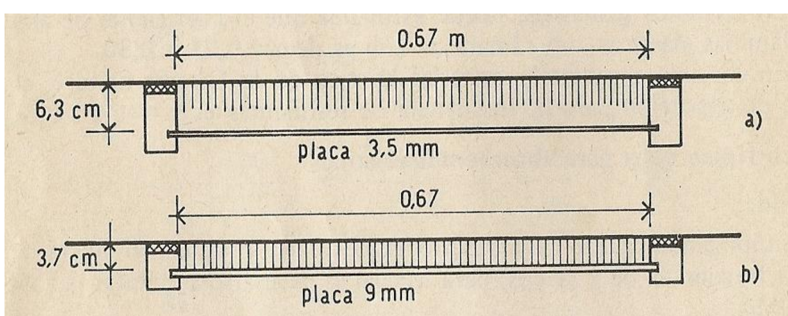
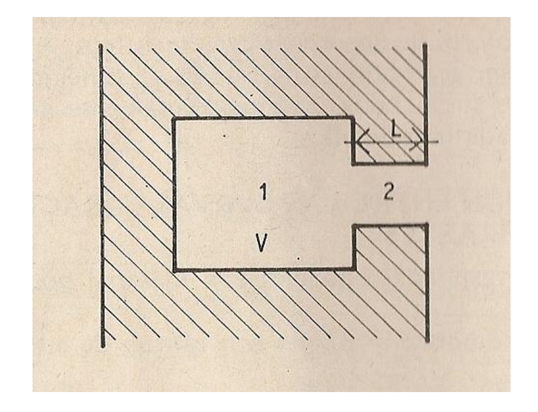


Figura 18 b. Corte horizontal de paneles vibrantes con adición de material absorbente

Figura 18. Paneles vibrantes

Resonadores Absorbentes:
El resonador es un dispositivo que consiste en una cavidad que comunica al exterior por un conducto estrecho, en cuya boca inciden las ondas sonoras. Estos son dimensionados teniendo en cuenta las frecuencias, son absorbentes muy importantes pero no son frecuentemente utilizados.
Consta de dos compartimientos, una cavidad con un determinado volumen de aire y un cuello de sección y longitud menores a la cavidad (Figura 19). Al incidir la presión sonora, el aire en el cuello se pone en movimiento alternativamente hacia adelante y hacia atrás, comportándose como un pistón dentro de un cilindro, mientras que el volumen de aire contenido en la cavidad actúa como un resorte o una masa

elástica. El sistema cumple con su función absorbente cuando al movimiento de la masa de aire contenida se le oponen fricciones en el cuello del resonador, generando un gasto de la energía sonora transformándola en energía calórica.



1- Cavidad del resonador
2- Cuello

Figura 19. Resonador absorbente.

Los resonadores simples resultan poco económicos, pues generalmente se utilizan varios de ellos en una misma superficie. Para ello se recurre a los resonadores acoplados, cuya diferencia consta en que contienen una sola cavidad cuyo volumen resulta igual a la suma de los volúmenes individuales.

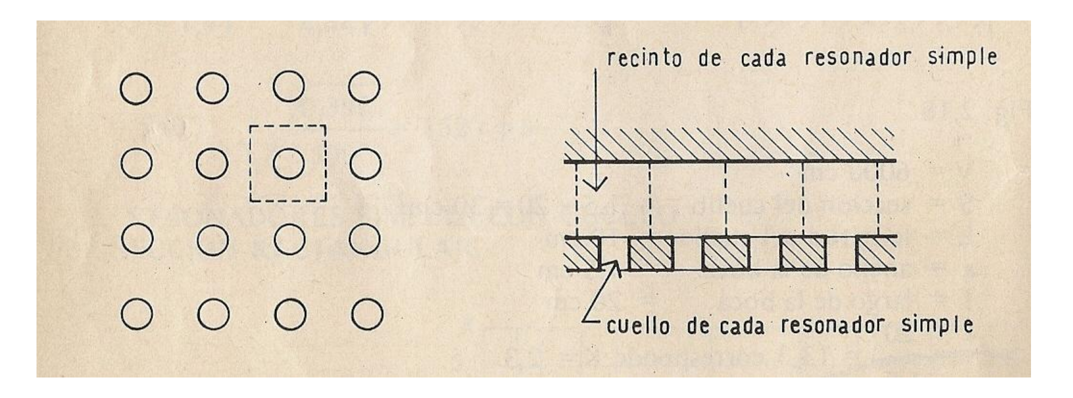


Figura 20. Batería de resonadores simples

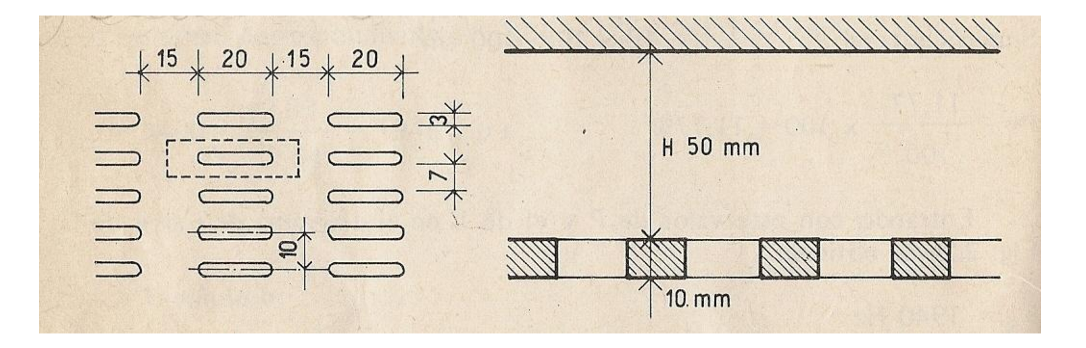
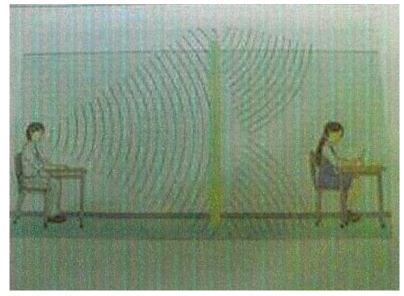


Figura 21. Resonadores acoplados

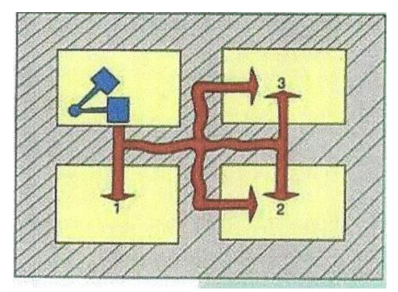
4. AISLACION ACUSTICA

4.1 CONCEPTO

Aislar acústicamente un ambiente significa impedir que los sonidos generados por ruidos externos sean percibidos desde el interior del mismo, mediante acciones tendientes a regular la relación entre la energía sonora transmitida y la incidente. Al hablar de ruidos externos, estamos haciendo referencia a aquellos emanados tanto desde el exterior como de ambientes o construcciones contiguas.
Es el medio comúnmente utilizado para combatir el ruido producido por fuentes externas al recinto en el que se desea bajar el nivel sonoro. En esencia se trata de cortar o debilitar, en la manera de lo posible, los caminos de propagación de las ondas sonoras, independientemente de la naturaleza de estos mismos.
Distinguimos que el ruido se propaga hacia el interior de los ambientes de dos maneras: por vía aérea y por vía solida. En el último de los casos, lo hace en forma de ruidos continuos, o por impacto



Propagacion via aerea



Propagación via solida

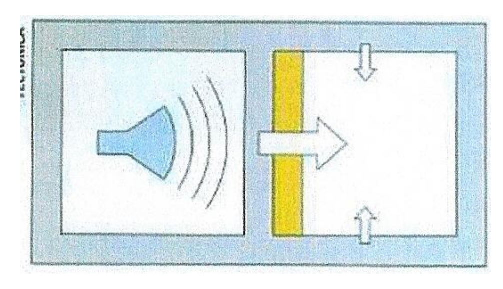
Figura 22.

4.2 TRANSMISION

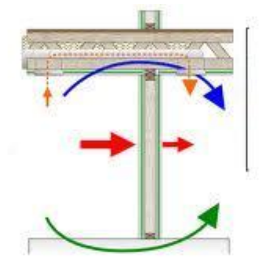
La transmisión de estos ruidos ajenos a un ambiente se efectúa siguiendo dos caminos:

Por vía directa a través del paramento:
Cuando las ondas sonoras inciden en el cerramiento, este queda sometido a un estado vibratorio transmitiendo sus deformaciones al aire del espacio contiguo, convirtiéndose en una nueva fuente productora de sonido. Como consecuencia de ello esta superficie sufre desplazamientos hacia dentro y hacia afuera. Los cerramientos son en general superficies permeables, es por ello que la presencia de intersticios, facilita que el sonido mediante frecuencias altas logre penetrarlo.

Por vía estructural:
La presión sonora mediante sus perturbaciones, no solo excita a la superficie divisoria sino también a los elementos adyacentes a la misma que conforman la estructura resistente. Así las vibraciones transmitidas primero vía solida en vigas, columnas, losas, etc., se convierten luego en ruidos aéreos en el recinto ajeno. Esto implica que el ruido percibido en un local, será como consecuencia, mayor que el que calculamos si solo tuviéramos en cuenta la transmitida a través del paramento. (Figura 23)



Transmisión por el paramento



transmisión por la estructura

Figura 23.

4.3 MATERIALES Y SISTEMAS AISLANTES

Aislación por tabiques simples:

En una pared simple la búsqueda de la aislación está dada por la condición de masa, cuya eficacia mejora ante altas frecuencias. Su capacidad aislante varía en función de ciertas características y circunstancias:

Peso: El aislamiento acústico está en función directa con su peso por unidad de superficie (Kg/m2), cuanto mayor es la masa superficial y más altas las frecuencias sonoras incidentes, dicha función crece en efectividad. Se ha establecido teóricamente que al duplicar la masa del paramento y ante frecuencias fijas, se logra aumentar la capacidad de aislación hasta 6 dB. Esta condición se cumple en un rango de octavas entre los 500 y 1000 Hz y hasta llegar a una aislación en 45 dB.
Angulo de incidencia: Otra característica a tener en cuenta es el ángulo de incidencia de la onda sonora. Cuando se produce una variación en la perpendicularidad de la incidencia de la onda sonora, comienza a disminuir la capacidad aisladora.

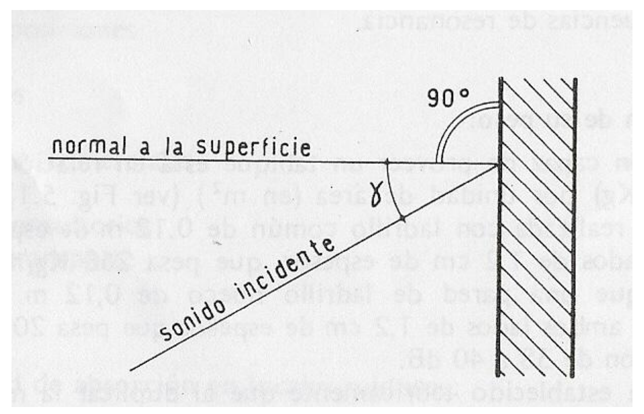
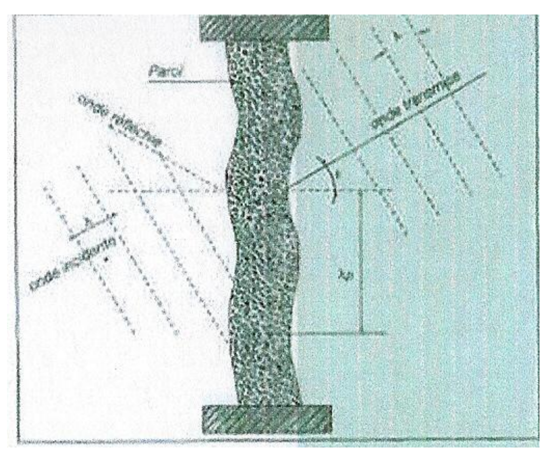


Figura 24. Angulo de incidencia

Frecuencias: Existen dos tipos de frecuencias a las que los cerramientos se ven afectados:
Frecuencia de resonancia: Se produce cuando las frecuencias son bajas. Cuando recibe una onda acústica el cerramiento comienza a vibrar en forma natural, provocándose en él un desplazamiento perpendicular al desarrollo de su superficie al que se denomina “efecto diafragma” o “efecto de tambor”.
Frecuencia crítica: Este fenómeno ocurre en forma paralela al efecto de diafragma o tambor, y se origina cuando las ondas sonoras incidentes coinciden en frecuencia con las ondas de flexión que se desarrollan a lo largo del paramento. Esto provoca un fenómeno llamado “efecto de coincidencia” donde se da una transferencia máxima de energía, provocando una caída en la capacidad de aislar. (Figura 25)


Figura 25.

Aislación por tabiques dobles:
También llamada aislación por masa- resorte – masa, es aquella que se plantea la aislación por particiones múltiples donde entre las dos superficies de masa, se propone una separación o cámara, con lo que de alguna manera, se busca aumentar la condición de espesor para resolver el problema aislante. El tabique compuesto para esta función, deberá tener en cuenta algunas condiciones:

De los componentes: Es la necesidad de que los tabique seleccionados tengan diferentes comportamientos ante frecuencias criticas y de resonancia, para evitar las vibraciones paralelas (al unísono) y su pérdida de efecto. Para ello se recomienda utilizar diferentes espesores y materiales. (Figura 26)

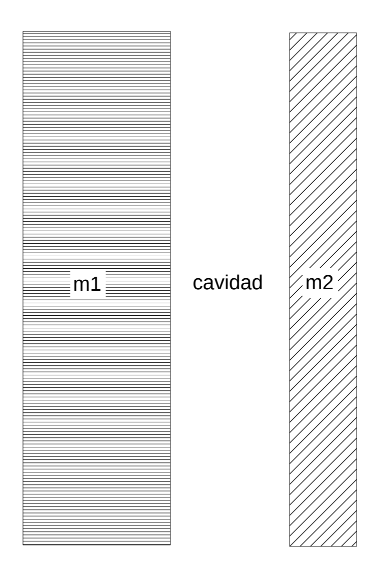
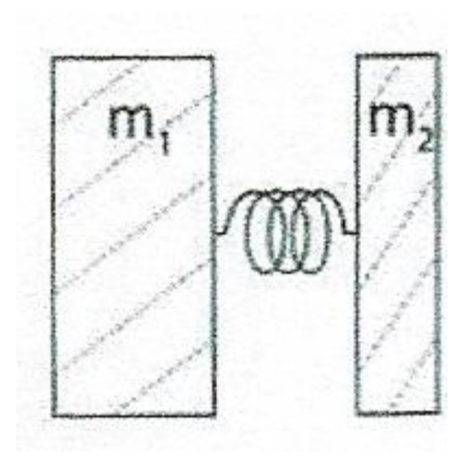


Figura 26.

De la cavidad: El efecto de la cavidad intermedia es producir el desgaste de la energía sonora transformándola en energía calórica. Estas actúan como un resorte entre ambos paramentos y de acuerdo al volumen y la distancia entre ambos cerramientos, puede llegar a ocurrir que se produzcan ondas estacionarias, y por consiguiente un aumento progresivo de la energía, que puede llegar a producir que la cavidad funcione como una cámara de resonancias. (Figura 27)



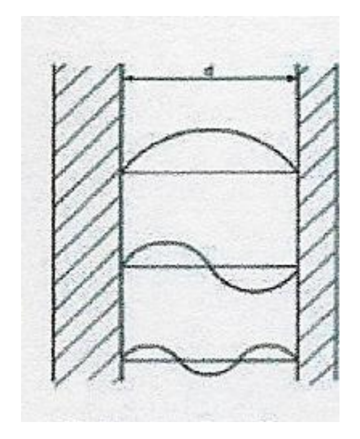


Figura 27

De las condiciones de vínculo: La construcción de particiones dobles obliga a tener absoluta independencia de masas, evitando puentes acústicos que puedan producir los vínculos rígidos tales como fijaciones. Para ello resulta de utilidad elementos vinculantes con propiedades tendientes a disminuir el efecto de transmisión sonora como el caso de materiales elastómeros.

Un análisis más detallado indica que para obtener una mayor aislación acústica, el cerramiento vertical resuelto con por un muro doble, acrecienta su aislación introduciendo material absorbente.
Entre las soluciones más comunes está la de elaborar una partición doble, anteponiendo al cerramiento vertical, tabiques conformados en general por sistemas de construcción en seco. La construcción de estos obliga a tener especial cuidado en el logro de la independencia de las masas y en evitar los ya nombrados puentes acústicos que puedan producir los vínculos rígidos.
La resolución material y constructiva, se suele efectuar, utilizando sistemas compuestos por placas de roca de yeso y una estructura de perfilería de chapa, o bien mediante placas y secciones de madera respectivamente. (Figura 28)

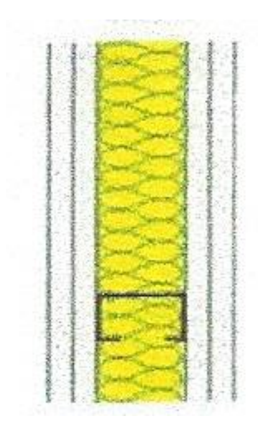
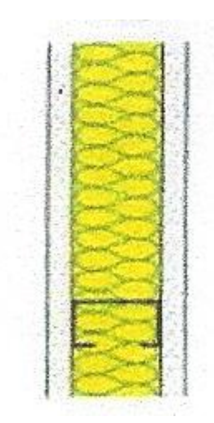




Figura 28.

La eficiencia de dichos sistemas se refuerza cuando se plantea usar caras dobles con estructuras independientes, para evitar conexiones rígidas propensas a transmitir vibraciones, la solución es más compleja e involucra mayores costos por lo cual conviene evaluar su aplicación. (Figura 29)

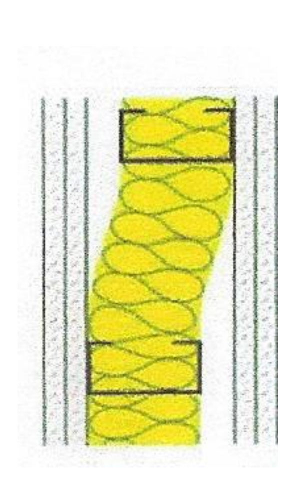
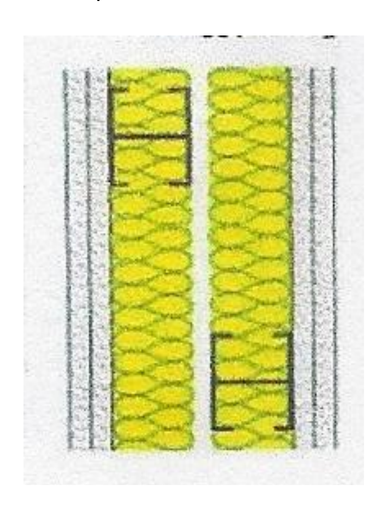
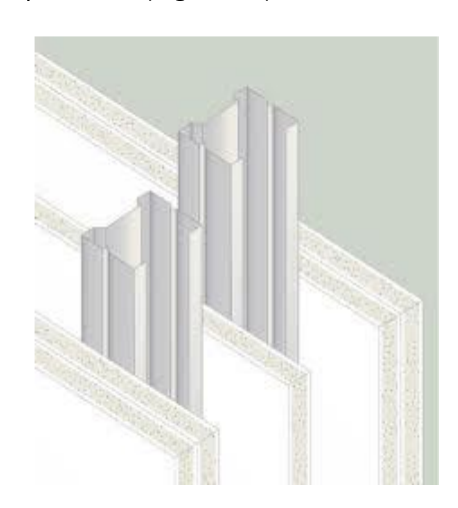




Figura 29.

Aislación en aberturas

Los puntos más débiles desde el punto de vista acústico, son las aberturas, cuando de aislación se trata. Los problemas que presentan son tanto el peso como el cierre.
Para el caso de las ventanas también se recurre al concepto de partición doble, mediante el doble vidriado hermético (DVH). En este caso, es conveniente el uso de vidrios gruesos (entre 6mm y 8mm), fijados al marco con masillas no endurecibles de siliconas. En la cavidad interior, se recurre al uso de material absorbente, como lana de vidrio o espuma de poliuretano. (Figura 30)

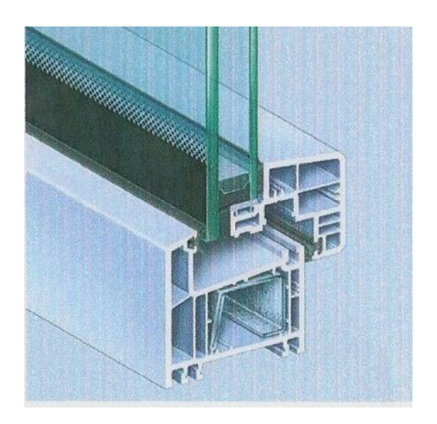
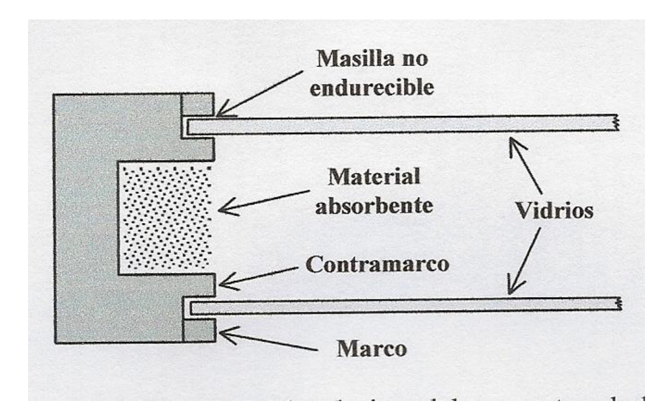



Figura 30. Tratamiento acústico en ventanas

Cuando se trata de puertas, el problema del peso llega a ser de gran importancia. Evidentemente cuando mayor es este, mejora la calidad de aislación. De todos modos no se puede exagerar en este sentido por problemas mecánicos.
La solución se presenta en utilizar puertas dobles o lo que es mejor dobles ingresos, la puerta común tiene una pérdida de transmisión de unos 20dB a 30dB, según si esta es maciza o puerta placa. En cambio con un par de puertas macizas se llega a lograr una pérdida de hasta 50dB, claro que ello acarrea un problema de espacio del cual debe disponerse. Al igual que el caso de ventanas, puede interponerse en el interior de la puerta entre placas material absorbente. (Figura 31)

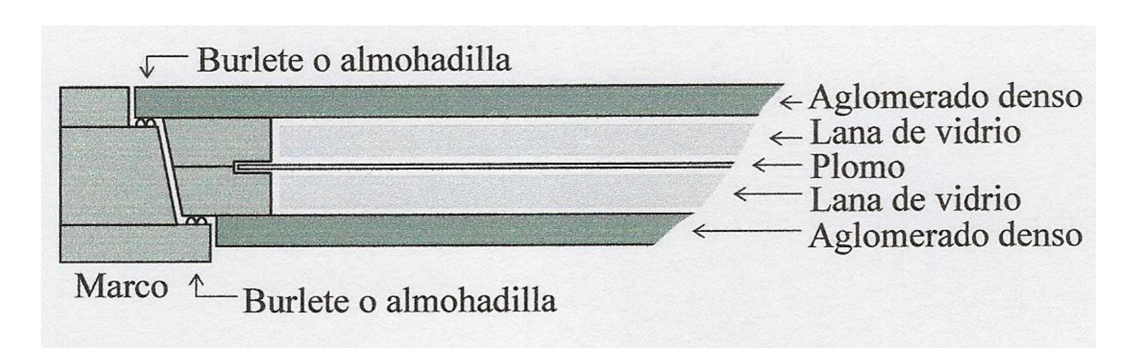


Figura 31. Aislación acústica en puertas

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Josse, Robert “La acústica en la construcción” Ediciones Gustavo Gili. Barcelona

Baschuchuk, Bernardo – Di Marco, Silvia “Manual de acústica para arquitectos” Espacio Editora Bs. As.

Behar, Alberto “El ruido y su control” Bowcentrum Bs. As.

Roederer, Juan G. “Acústica y psicoacustica de la música” Ricordi Americana Bs. As.